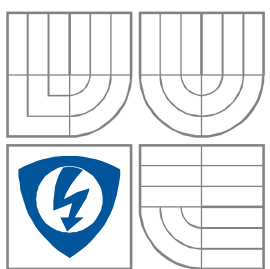


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# **MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH CHARAKTERISTIK MIKROFONŮ**

MEASUREMENT OF GENERAL CHARACTERISTICS OF MICROPHONES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**PETR ORSÁG**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.**

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Petr Orság  
**Ročník:** 3

**ID:** 72991  
**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

Měření základních charakteristik mikrofonů

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s vlastnostmi běžně používaných snímačů akustického tlaku (mikrofonů) a měřením jejich základních charakteristik.
- 2) Vypracujte přehled metod a zejména praktických postupů a doporučení pro měření parametrů mikrofonů - využijte přístupy do elektronických databází (patenty, články).
- 3) Rozeberte a stanovte nutné podmínky při měření (volný prostor, okolní hluk) pro jednotlivé metody a možnosti vybušení nežádoucích vlivů (konstrukční, programové).
- 4) Navrhněte měřicí pracoviště a realizujte měření zvolených charakteristik (zejména frekvenční charakteristiky) u elektretových a MEMS mikrofonů. K měření je možné využít referenční mikrofon PCB a měřicí kartu NI 9234. Vytvořte odpovídající zpracovávací software v prostředí LabVIEW pro měření základních charakteristik mikrofonů.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Škvor, Z. Elektroakustika a aplikovaná akustika. Skripta ČVUT. Praha, 1994.
- [2] Eargle, J. The Microphone Book, Second Edition: From mono to stereo to surround - a guide to microphone design and application. 368 stran. Focal Press, 2004. ISBN 978-0240519616.
- [3] Patentová databáze European Patent Office - espacenet. Dostupné z <ep.espacenet.com>.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 30.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Úkolem této bakalářské práce je seznámení s vlastnostmi běžně používaných snímačů akustického tlaku (mikrofonů) a jejich měření. Dále se zabývá návrhem měřicího pracoviště a zpracovávacího softwaru pro měření frekvenční charakteristiky mikrofonů.

## **Klíčová slova**

Mikrofon, MEMS, citlivost, frekvenční charakteristika, měřicí pracoviště, Labview

## **Abstract**

The task of this Bachelor's thesis is to introduce the characteristics usually used acoustic pressure sensors (microphones) and their measurement. It deals with design of the measurement workplace and the treatment software for measuring the frequency response of microphones.

## **Keywords**

Microphone, MEMS, sensitivity, frequency response, measurement workplace, Labview

### **Bibliografická citace:**

ORSÁG, P. *Měření základních charakteristik mikrofonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Měření základních charakteristik mikrofonů* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **30. května 2011**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **30. května 2011**

.....  
podpis autora

# OBSAH

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Úvod .....  | 9  |
| 2     | Elektroakustika .....   | 10 |
| 2.1   | Zvuk .....  | 10 |
| 2.1.1 | Hluk .....  | 11 |
| 2.1.2 | Intenzita zvuku .....   | 11 |
| 2.1.3 | Hladina intenzity zvuku .....                                   | 11 |
| 2.1.4 | Hladina akustického tlaku .....                                 | 12 |
| 2.2   | Elektroakustický řetězec .....                                  | 12 |
| 2.3   | Elektroakustický měnič .....                                    | 12 |
| 2.4   | Mikrofon .....  | 13 |
| 3     | Typy Mikrofonů .....  | 14 |
| 3.1   | Mems mikrofon [6] .....   | 14 |
| 3.1.1 | Kapacitní MEMS mikrofony MCM (MEMS Capacitive Microphone) ..... | 14 |
| 3.2   | Kondenzátorový (kapacitní) mikrofon .....                       | 15 |
| 3.2.1 | Elektretový mikrofon .....                                      | 15 |
| 3.3   | Dynamický mikrofon .....  | 16 |
| 3.4   | Uhlíkový mikrofon .....   | 17 |
| 3.5   | Krystalový – piezoelektrický mikrofon .....                     | 18 |
| 4     | Základní vlastnosti mikrofonů .....                             | 19 |
| 4.1   | Citlivost .....   | 19 |
| 4.2   | Šum .....   | 19 |
| 4.3   | Impedance .....   | 19 |
| 4.4   | Frekvenční charakteristika .....                                | 20 |
| 4.5   | Směrová charakteristika .....                                   | 20 |
| 5     | Kalibrační metody .....   | 22 |
| 5.1   | Metoda reciprocity (primární metoda) .....                      | 22 |
| 5.1.1 | Tlaková kalibrace .....   | 22 |
| 5.1.2 | Kalibrace v poli postupné vlny .....                            | 22 |
| 5.1.3 | Kalibrace v difuzním poli .....                                 | 23 |
| 5.2   | Metoda pistonfonu a membranofonu .....                          | 23 |
| 5.3   | Elektrostatická kalibrační metoda .....                         | 23 |
| 5.4   | Kompenzační metody .....  | 24 |
| 5.5   | Substituční metoda .....  | 24 |
| 5.5.1 | Srovnávací metoda .....   | 25 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6     | Měřicí pracoviště.....  | 26 |
| 6.1   | Referenční mikrofon Brüel & Kjær Type 4189 .....                        | 27 |
| 6.2   | Mikrofon PCB model 378B02 .....   | 28 |
| 6.3   | Reproduktor .....   | 29 |
| 6.4   | NI PXI – 1033 .....   | 29 |
| 6.4.1 | Karta NI PXI – 6259 .....   | 30 |
| 6.4.2 | Karta NI PXI – 4462 .....   | 30 |
| 7     | Zpracovávací software .....   | 31 |
| 7.1   | Blokový diagram hlavního programu .....                                 | 31 |
| 7.1.1 | Výstupní kanál pro generování signálu (master).....                     | 31 |
| 7.1.2 | Vstupní kanály pro sběr dat (slave).....                                | 32 |
| 7.1.3 | Synchronizace hodin .....   | 32 |
| 7.1.4 | Část zpracování získaných průběhů z mikrofonů.....                      | 33 |
| 7.1.5 | Posloupnost měřených frekvencí .....                                    | 33 |
| 7.2   | Front panel hlavního programu .....                                     | 34 |
| 7.3   | Programy pro kalibraci mikrofonů pomocí kalibrátoru B&K type 4231 ..... | 34 |
| 8     | MĚŘENÍ.....   | 35 |
| 8.1   | Kalibrace kalibrátorem B&K type 4231 .....                              | 35 |
| 8.2   | Měření č.1 .....  | 35 |
| 8.3   | Měření č.2 .....  | 37 |
| 8.3.1 | Reproduktor ARZ 6608.....   | 37 |
| 8.3.2 | Reproduktor ARZ 369.....  | 38 |
| 8.4   | Měření č.3 .....  | 39 |
| 9     | Závěr.....  | 41 |
|       | Seznam tabulek .....  | 42 |
|       | Seznam zkratk .....   | 42 |
|       | Seznam obrázků .....  | 43 |
|       | Literatura.....   | 45 |
|       | Seznam příloh .....   | 46 |



# 1 ÚVOD

Na základě zadání jsem se seznámil s vlastnostmi akustických snímačů a problematiky jejich měření. Navrhnul a provedl jsem praktické měření frekvenčních charakteristik. Všechny postupy při splňování úkolů zadání jsem sepsal v této práci.

Práce je rozdělena na sedm kapitol, které jde rozdělit na dvě hlavní části, teoretickou a praktickou. První čtyři kapitoly přibližují problematiku týkající se mikrofonů. Jsou popsány základní pojmy z elektroakustiky a typy mikrofonů. Další kapitoly se věnují vlastnostem snímačů akustického tlaku a rozebírají metody jejich měření. Tím se uzavírá teoretická část a práce přechází v praktickou část.

Úkolem praktické části je navrhnutí měřícího pracoviště pro automatické měření frekvenční charakteristiky neznámého mikrofonu. V práci je uvedeno blokové schéma pracoviště a popis všech částí. V další kapitole je popsán navrhnutý zpracovávací software v prostředí Labview.

Poslední kapitola obsahuje praktická měření, kterými byly zjišťovány nejlepší postupy a nastavení, aby bylo dosaženo přibližné přesnosti.

## 2 ELEKTROAKUSTIKA

Je vědní obor spojující akustiku s některými elektrotechnickými a elektronickými disciplínami. Zahrnuje všechny obory, které se zabývají příjmem, přenosem, uchováním a reprodukcí akustických signálů ve slyšitelné oblasti. Využitím elektroakustiky v našem životě je široké, například jednoduchá spotřební elektronika, hifi technika, telekomunikační přístroje.[1]

Úzce souvisí s různými oblastmi akustiky (stavební, hudební, hluku...), většina sledovaných dějů probíhá v plynech (především vzduch) anebo v kapalinách (především voda).

### 2.1 Zvuk

Obecně je zvuk součástí životního prostředí, tvoří důležitou složku pro spojení lidí i živočichů s okolím a mezi sebou. Je to mechanické vlnění související s kmitáním pružných prostředí (plyny, kapaliny nebo pevné látky), jedná se o zhušťování a zředňování částic.[3]

Rychlost šíření zvuku je dána pro dané prostředí a zejména závisí na jeho teplotě. Ve vzduchu o teplotě  $t[^\circ\text{C}]$  má zvuk rychlost danou vztahem:

$$v_t = 331,82 \cdot 0,61t \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

**Tab.1:** Rychlost šíření zvuku v některých prostředích

| Prostředí        | Rychlost $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ |
|------------------|---|
| Vzduch (13,41°C) | 340                                     |
| Voda (25 °C)     | 1500                                    |
| Helium (25 °C)   | 965                                     |
| Rtuť (25 °C)     | 1450                                    |
| Ocel             | 5000                                    |

Z hlediska frekvence se udává jako slyšitelné pásmo (audiofrekvenční pásmo) rozsah 16Hz až 20kHz. V tomto pásmu probíhá lidská řeč, hudba, ale i hluk, vznikající jako doprovodný jev lidské činnosti. Ze strany nízkých kmitočtů sousedí se slyšitelným pásmem infrazvuk a ze strany vysokých kmitočtů pak ultrazvuk. V závislosti na frekvenci se mění délka vlny zvuku dle vzorce:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [\text{m}; \text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{Hz}]$$

### 2.1.1 Hluk

Specifickou formou zvuku je hluk, který se dá popsat jako nepravidelné nebo náhodné kmitání. Z hlediska subjektivního vnímání se tedy jedná o nepříjemný, rušivý, nežádoucí či škodlivý zvuk, který je ovlivněn mnoha faktory (informační obsah, věk a zdravotní stav člověka, doba trvání).

### 2.1.2 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku je veličina, která udává energii odpovídající akustickému výkonu  $\Delta P$  přeneseného na plochu  $\Delta S$ :

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad [\text{W} \cdot \text{s}^{-2}]$$

V souvislosti s citlivostí lidského ucha se zavádí práh slyšení a práh bolesti. Práh slyšení je charakterizován nejmenší intenzitou zvuku ( $10^{-12} \text{W} \cdot \text{s}^{-2}$ ), kterou vnímáme. Naopak intenzita zvuku ( $1 \text{W} \cdot \text{s}^{-2}$ ), která může způsobit bolestivý pocit, charakterizuje práh bolesti.

### 2.1.3 Hladina intenzity zvuku

Hladina intenzity (hlasitosti) zvuku se vyjadřuje pomocí logaritmické stupnice, jelikož poměr nejnížší a nejvyšší hodnoty intenzity je  $10^{12}$ . Vztah pro výpočet hladiny intenzity zvuku, kde  $I$  je intenzita zvuku a  $I_0$  je intenzita prahu slyšení ( $10^{-12} \text{W} \cdot \text{s}^{-2}$ ):

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}]$$

**Tab.2:** Hladiny intenzit různých zdrojů zvuku

| <b>Zdroje zvuku</b>        | <b>Hladina intenzity zvuku<br/>[dB]</b> |
|----------------------------|---|
| Práh slyšení               | 0                                       |
| Šum listí při slabém větru | 10                                      |
| Klidná zahrada             | 20                                      |
| Tichý šepot                | 30                                      |
| Klidná knihovna            | 40                                      |
| Pouliční hluk              | 50                                      |
| Hlasitý hovor              | 60                                      |
| Hlučný hostinec            | 70                                      |
| Silně reprodukováná hudba  | 80                                      |
| Jedoucí vlak               | 90                                      |
| Pneumatická sbíječka       | 100                                     |
| Diskotéka                  | 110                                     |
| Startující letadlo         | 120                                     |
| Práh bolesti               | 130                                     |
| Akustické trauma           | 140                                     |

## 2.1.4 Hladina akustického tlaku

Míru akustické intenzity lze vyjádřit jako hladinu akustického tlaku  $L_p$ . Je dána logaritmickým vyjádřením poměru skutečné hodnoty tlaku  $p$  a hodnoty tlaku prahu slyšení  $p_0$  (20  $\mu\text{Pa}$ ):

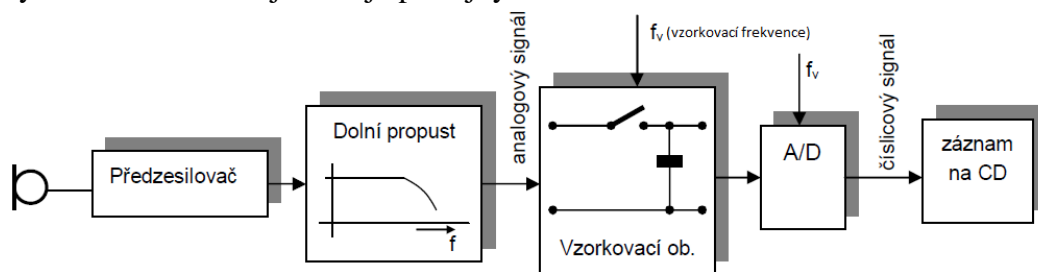
$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}]$$

## 2.2 Elektroakustický řetězec

Úkolem řetězce je snímat, zesilovat, upravovat, zaznamenávat a nakonec reprodukovat zvuk. Z hlediska částí se dá řetězec shrnout do tří základních částí:

- Zdroj signálu (elektroakustický měnič, elektronický obvod, optický měnič)
- Obvody pro zesílení a úpravu signálu
- Elektrické spotřebiče (elektroakustický měnič, měřicí doplňkové obvody)

Kvalita řetězce je spojena s kvalitou jednotlivých částí, zejména pak s kvalitou nejslabšího článku. Řešení kvality elektroakustického řetězce spočívá v kompromisu, kdy se volí části se stejnou nejlépe nejvyšší kvalitou.



**Obr.1:** Elektroakustický řetězec se snímačem zvuku a záznamem na CD

## 2.3 Elektroakustický měnič

Elektroakustický měnič mění akustický signál na elektrický nebo naopak. Změny je docíleno prostřednictvím mechanických systémů. Jestliže se jedná o změnu akustického signálu na elektrický, mluvíme o přijímači (mikrofon), při změně elektrického signálu na akustický mluvíme o vysílači (reproduktor).

Pro přeměnu mechanické energie mechanického systému na elektrickou energii a naopak se využívá různých principů (např. elektrodynamický, elektromagnetický, magnetodynamický, elektrostatický, piezoelektrický).

## 2.4 Mikrofon

Jako první člen elektroakustického řetězce má velký vliv na kvalitu signálu, používá se jako zdroj signálu pro další obvody zpracování.

Mikrofon se skládá z membrány a elektromechanického měniče. Akustický signál projevující se změnami akustického tlaku rozechvívá membránu a tento pohyb je snímán měničem.

Jestliže akustický tlak působí jen na jednu stranu membrány, tak se jedná o tlakový mikrofon. Amplituda výchylky membrány u tohoto mikrofonu závisí pouze na akustickém tlaku, na směru ani vzdálenosti zdroje nezávisí.

Přivede-li se akustický signál vhodným způsobem i na zadní stranu membrány nezávisí výchylka na akustickém tlaku, ale na rozdílu akustického tlaku před a za membránou (čím větší rozdíl, tím větší výchylka). Tyto mikrofony se nazývají gradientní. [3]

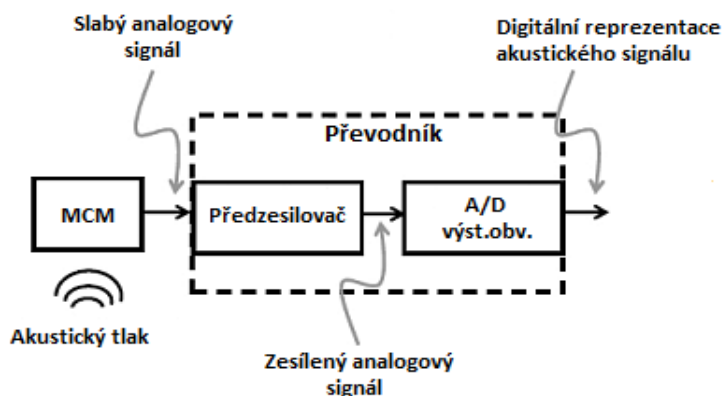
## 3 TYPY MIKROFONŮ

### 3.1 Mems mikrofon [6]

Pod tímto označením se skrývá miniaturní křemíkový mikrofon, který je vyroben v podobě jediné integrované součástky (CMOS čipu). Součástka zapouzdřuje křemíkovou na tlak citlivou membránu upevněnou na křemíkový čip, integrovaný předzesilovač a případně i další pomocné obvody jako jsou různé aktivní filtry pro odstranění nežádoucích složek přijímaného zvuku. Pro připojení k dnešním plně digitálním systémům se do MEMS mikrofonů integrují A/D převodníky, které vytváří digitální sériová data. Ve většině případů se jedná prakticky o systém kapacitního mikrofonu, kdy se snímá změna tlaku. Celý mikrofon je jedna kompaktní součástka velikosti maximálně několika mm. U MEMS mikrofonů se využívá například i piezoelektrických a piezorezistivních principů či optické detekce, přesto většina produkce mikrofonů MEMS (80%) využívá kapacitního principu (poskytuje vysokou citlivost a levnou výrobu).

#### 3.1.1 Kapacitní MEMS mikrofony MCM (MEMS Capacitive Microphone)

Vylepšily mnoho vlastností elektretových mikrofonů, jsou výrazně menší a přizpůsobeny k automatickému vysokoteplotnímu osazování desek plošných spojů. Tyto mikrofony jsou dost odolné proti mechanickému poškození. Hlavní výhodou je však možnost monolitické integrace na společný křemíkový CMOS čip s elektronickými analogovými i digitálními obvody. Dají se využít obecně jako akustické senzory snímající i jiné frekvence než lidský hlas a jsou vhodné například i pro systémy automatické detekce opotřebení strojů.



**Obr.2:** Typické blokové schéma MEMS mikrofonu složené ze snímací části a převodníku

Důležitost je kladena na provedení převodníku, který určuje výsledné vlastnosti mikrofonu, zároveň musí zajistit co nejlepší a nejpřesnější zpracování velmi malých změn výstupu senzoru bez znehodnocení parazitními vlivy. Kvůli realizaci CMOS technologií je třeba, aby elektrické zapojení mikrofonu bylo co nejjednodušší. Tyto mikrofony běžně pracují v bateriově napájených systémech, proto se klade důraz na nízkou spotřebu elektrické energie.

## **3.2 Kondenzátorový (kapacitní) mikrofon**

Mikrofonní systém funguje na kondenzátorovém principu (pár kovových paralelních destiček oddělených izolátorem, uchovávajících elektrický náboj). Celý princip je založen na změně kapacity kondenzátoru tím, že se změní vzdálenost mezi oběma deskami, což má za následek změnu napětí mezi deskami. Připojíme-li mezi napájecí napětí a kapacitu určitý odpor, můžeme na něm v závislosti na protékajícím proudu odvodit napěťové změny, které se přivádějí na vstup vysokoimpedančního zesilovače.

U kapacitního mikrofonu je jedna vodivá destička pevně uchycena (obsahuje díry pro průchod vzduchu), druhá má podobu pružné plastické membrány, na které je napařena tenká kovová vrstva. Je-li na obou deskách systému přítomen příslušný el. náboj, jakýkoli pohyb membrány způsobuje změnu kapacity. Na odporu se projevuje změna napětí.

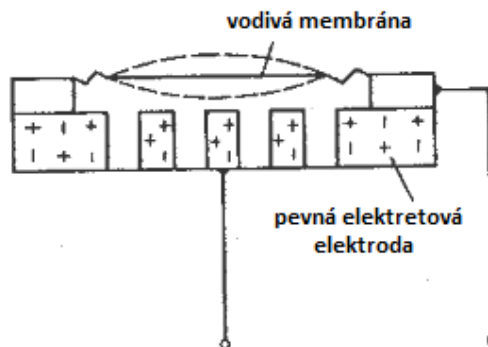
Systém funguje pouze při přivedení tzv. Phantomového napájení, které nám zaručuje přítomnost elektrického náboje na deskách. Použitím tranzistorů FET nebo elektronek v předzesilovači (vysoká vstupní impedance) se zamezuje oslabování náboje na deskách.

Složitější konstrukce kondenzátorového typu se promítá v jejich vyšší ceně. Ze všech klasických mikrofonních systémů jsou nejcitlivější a za předpokladu kvalitního předzesilovače mají velmi nízký šum. Jejich kmitočtová charakteristika je vyrovnaná a překračuje hranice lidského sluchu. Jsou náchylné na vlhkost.

### **3.2.1 Elektretový mikrofon**

Je typ kondenzátorového mikrofonu, který se liší tím, že elektrický náboj není na membránu přiváděn z napájecího zdroje, ale je její součástí. To je zajištěno výrobou membrány z materiálu s velmi dobrými izolačními vlastnostmi a časovou stálostí. Součástí elektretové kapsle bývá předzesilovač napájený z nějakého zdroje (dříve např. z tužkové baterie), aby bylo možné přivést z mikrofonu nějaký signál.

Elektretové mikrofony mají výrazně nižší výrobní náklady, přesto dávají kvalitní signál.



**Obr.3:** Princip elektretového mikrofону s pevnou elektretovou elektrodou

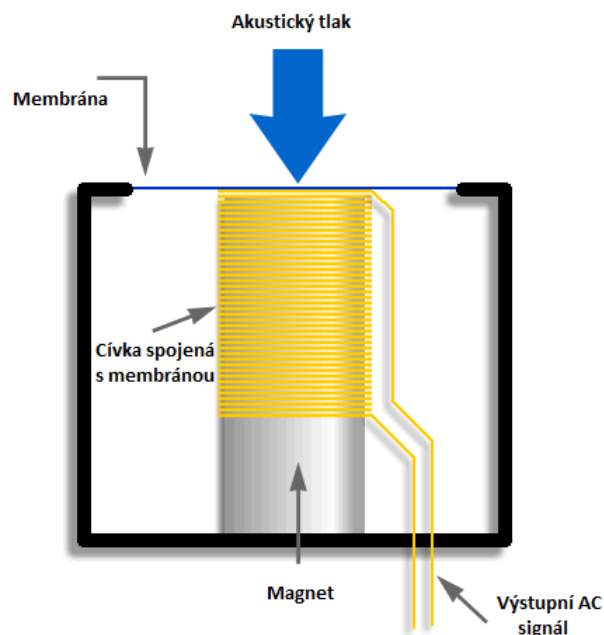
### 3.3 Dynamický mikrofón

Je to rozšířený typ, který je velmi mechanicky odolný a snáší i extrémně vysoké úrovně akustického tlaku. Tyto mikrofony nevyžadují žádné napájení, jelikož neobsahují žádné elektronické obvody. Vstupní předzesilovač musí mít větší zesílení, protože jejich výstupní signál je velmi slabý. Kvůli zesílení vstupního předzesilovače dochází k nárůstu šumu a to omezuje použití. Používají se zejména pro snímání hlasitějších zvuků z menších vzdáleností. Jejich výroba není nákladná.[3]

Princip konstrukce dynamického mikrofónu je velmi podobný konstrukci reproduktoru. Uvnitř mikrofónní hlavy je umístěna kapsle, která se skládá z lehké kruhové membrány (materiálem membrány je tenká plastická hmota). Membrána je mechanicky spojená s cívkou. Cívka se pohybuje v permanentním magnetu a tím, že membrána kmitá podle změn akustického tlaku, převádí kmity na pohyb cívky. V závitech cívky se pohybem v magnetickém poli vytváří slabý elektrický proud.

Samotná hmotnost, a stejně tak i velikost membrány ovlivňuje výsledné vlastnosti mikrofónního systému. Větší membrána má lepší hodnoty šumu (signál je vytvářen tlakem vyššího počtu molekul vzduchu), ale tím vyšší má setrvačnost (hmotnost membrány). Setrvačnost má za následek pokles frekvenční charakteristiky v oblasti vyšších kmitočtů. U velké membrány je další problém se zvuky přicházejícími mimo osu mikrofónu, jelikož dorazí na jednu stranu membrány dříve než na druhou, to má za následek kombinaci některých vyšších frekvencí mimo fázi (zvuková kvalita vyšších tónů se značně snižuje). Naopak má velká membrána nižší rezonanční kmitočet, a tím lépe přenáší hluboké frekvence. Proto je velikost membrány dynamického mikrofónu záležitostí kompromisu, i když je jedním ze základních parametrů, které určují využití daného mikrofónu.



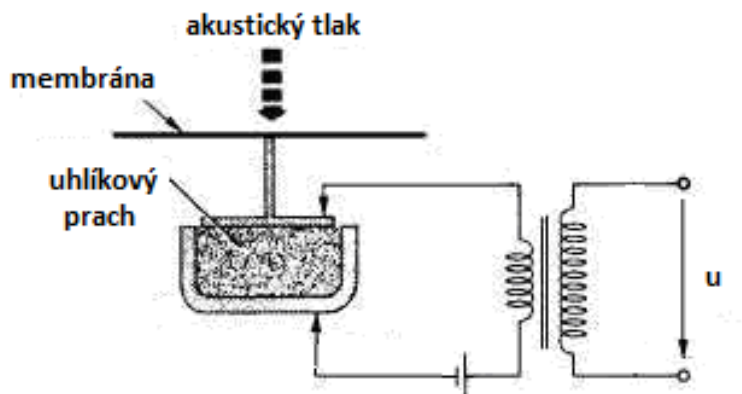


**Obr.4:** Princip dynamického mikrofону

### 3.4 Uhlíkový mikrofón

První prakticky použitelný mikrofón. Skládá se z uhlíkového prachu umístěného mezi dvěma elektrodami, z nichž jedna je pevná a druhá spojená s pohyblivou membránou. Odpor uhlíkového prachu se mění změnou tlaku, který vyvolává pohyblivá membrána. Membrána je kónická a zhotovená z hliníkové fólie, ve svém středu je opatřena pozlacenou elektrodou, která zasahuje do prachové komůrky. Mikrofón se vyrábí v podobě mikrofonních vložek pro telefonní přístroje. Má omezený kmitočtový rozsah (200 - 3400Hz).

Jeho výroba je však velmi jednoduchá a levná. Nevýhoda tohoto mikrofónu je omezený kmitočtový rozsah a vysoká náchylnost na otřesy (přesýpání uhlíkového prachu vytváří značný hluk).

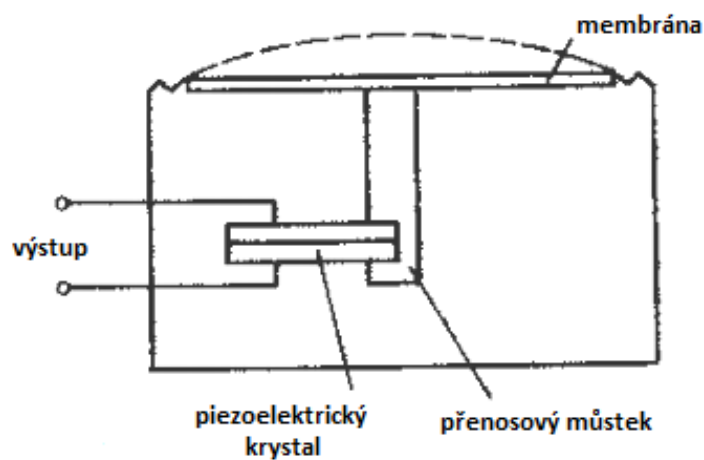


**Obr.5:** Princip uhlíkového mikrofónu

### 3.5 Krystalový – piezoelektrický mikrofon

Využívá piezoelektrického jevu, při němž deformací výbrusu krystalu Seignettovy soli vzniká na jeho plochách elektrický náboj. Provedení může být buď bezmembránové, kdy zvuk působí přímo na výbrus krystalu, nebo membránový, kdy kmitání membrány je mechanicky přenášeno na výbrus krystalu.

Krystalové mikrofony se nejvíce vyráběly v padesátých letech minulého století. Výroba je levná a jednoduchá. Pro svoji nízkou kvalitu byly později nahrazovány jinými typy.



**Obr.6:** Princip piezoelektrického mikrofonu v membránovém provedení

## 4 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MIKROFONŮ

### 4.1 Citlivost

Citlivost mikrofону je poměr výstupního napětí mikrofону a akustického tlaku, který toto napětí vybudil. Udává se v jednotkách V/Pa, je možné ji vyjádřit též relativní hodnotou v dB vztaženou k referenční úrovni 1 V/Pa:

$$dB = 20 \log \frac{\text{citlivost}[V/Pa]}{1}$$

Jedná se o veličinu obecně frekvenčně závislou. Citlivost je nejdůležitějším parametrem, od kterého se odvíjí další důležité charakteristiky (frekvenční charakteristika, směrová charakteristika). Jestliže potřebujeme zjistit hodnotu citlivosti, mluvíme o kalibraci mikrofону.

Pro dynamický mikrofón používaný blízko zdroje zvuku (ústa zpěváka) je typická citlivost asi 2,5mV/Pa (-52dBV). Tento mikrofón je použitelný pouze pro malé vzdálenosti. Kondenzátorový ruční mikrofón s citlivostí 4mV/Pa (-48dBV) umožní větší vzdálenost než zmíněný dynamický mikrofón. Na druhou stranu se vyrábí mikrofóny s vyšší citlivostí pro různé případy použití a potřeby odběratelů. Například ½ palcový mikrofón Brüel & Kjær Low-noise Free-field TEDS – Type 4955 má citlivost 1,1V/Pa.

### 4.2 Šum

Šumové vlastnosti mikrofónu se vyjadřují odstupem šumového napětí. Je to poměr mezi výstupním napětím mikrofónu, které vyvolá referenční hladina zvuku 94dB (tomu odpovídá akustický tlak 1Pa), a šumovým napětím na výstupu mikrofónu při jeho umístění v dokonale tichém prostředí. Vlastní šum mikrofónu je způsoben elektrickými obvody (cívka, zesilovač, atd.) a tepelným pohybem molekul vzduchu, které narážejí na membránu. Například u některých mikrofónů se šum pohybuje kolem 15dB. Rozsah šumu je veliký, záleží na určitých typech mikrofónů a na jejich vlastním vnitřním složení.

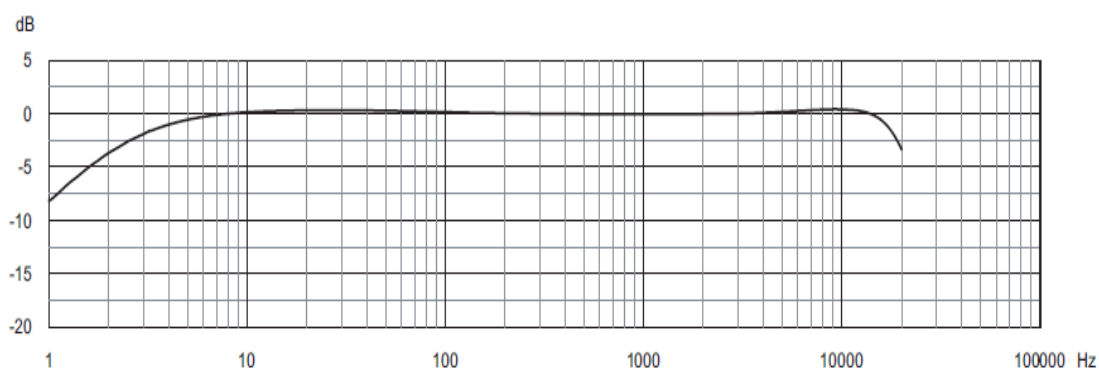
### 4.3 Impedance

Elektrická impedance mikrofónu je impedance změřená na jeho výstupních svorkách. Je to poměr výstupního napětí mikrofónu naprázdno k výstupnímu proudu nakrátko. Její hodnota je důležitá pro optimální připojení mikrofónu k zesilovači.

Impedance je frekvenčně závislá a většinou se udává pro 1kHz. Vstupní impedance zesilovače by měla být 5 - 10krát větší než impedance mikrofonu. Zatížení mikrofonu příliš nízkou vstupní impedancí zesilovače má za následek zkreslení frekvenční charakteristiky, zvýšení zkreslení a snížení poměru signálu k šumu.

## 4.4 Frekvenční charakteristika

Frekvenční charakteristika udává rozsah přenášeného pásma akustických signálů. Jedná se o závislost výstupního napětí mikrofonu na frekvenci (při konstantním akustickém tlaku) nebo citlivosti mikrofonu na frekvenci. Znázorněna bývá nejčastěji v rozsahu 20Hz - 20kHz. Každý kus mikrofonu má odlišnou frekvenční charakteristiku, proto kvalitní výrobci mikrofonů měří frekvenční charakteristiky u každého kusu.



**Obr.7:** Frekvenční charakteristika mikrofonu Brüel & Kjær (½-inch Prepolarized Free-field Microphone – type 4950)

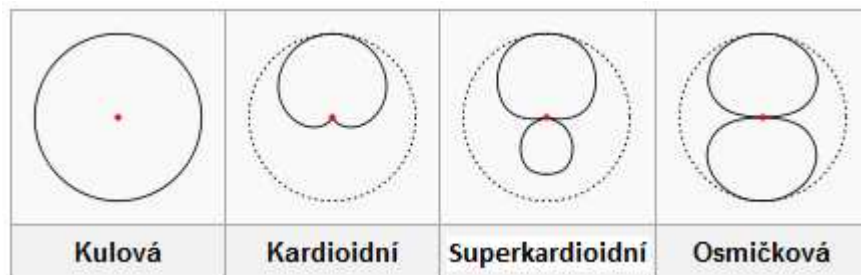
## 4.5 Směrová charakteristika

Směrová charakteristika je závislost citlivosti mikrofonu na úhlu, který svírá akustická osa mikrofonu s osou akustického zdroje. U rotačně symetrických mikrofonů je akustická osa většinou totožná s osou geometrickou, u ostatních bývá určena výrobcem.

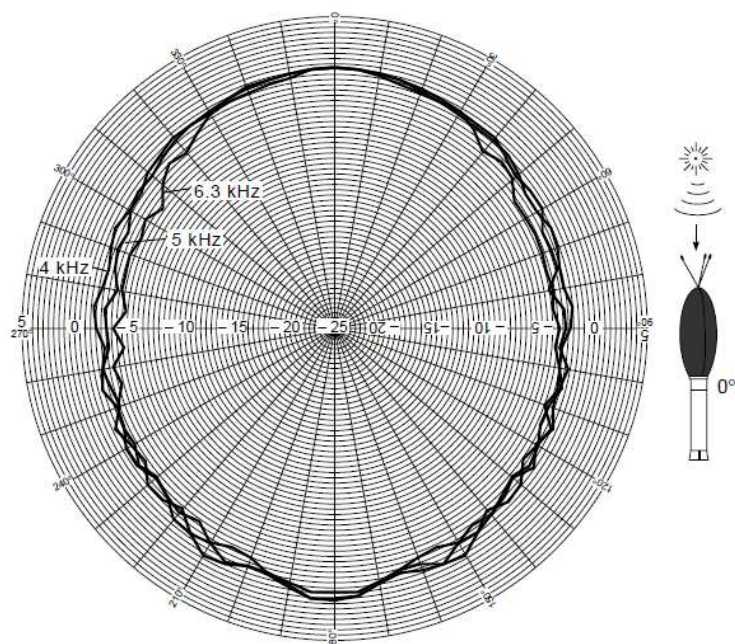
Tyto charakteristiky se zaznamenávají do kruhového diagramu, který je u naprosté většiny výrobců k danému typu mikrofonu k dispozici. V kruhovém diagramu bývá často uvedeno více směrových charakteristik (většinou jinou barvou) daného mikrofonu pro různé frekvence.

Typy směrových charakteristik:

- Všesměrová neboli kulová charakteristika (omni-directional)
- Osmičková charakteristika (bi-directional)
- Kardioidní neboli ledvinová charakteristika (cardioid)
- Superkardioidní charakteristika (super-cardioid)



**Obr.8:** Tvary směrových charakteristik mikrofonů



**Obr.9:** Směrová charakteristika mikrofonu Brüel & Kjær (Outdoor Microphone Unit – Type 4198)

## 5 KALIBRAČNÍ METODY

Základní kalibrační metody se provádí v uzavřené cejchovní dutině (přepokládá se, že akustický tlak je harmonický a rovnoměrně rozložen na ploše membrány). Kalibrace se může také provádět ve volném poli (postupná vlna), v poli stojaté vlny (rovinné) nebo v difuzním poli. Při měření ve volném a difuzním poli je třeba provést korekci, kvůli ohybu vlny na tělese mikrofonu (délka vlny je srovnatelná s průměrem tělesa mikrofonu).[2]

### 5.1 Metoda reciprocity (primární metoda)

Metoda reciprocity je absolutní cejchovní metoda používaná pro kalibraci kondenzátorových palcových mikrofonů, kdy se využívá jejich reciprokých vlastností (možnost použití mikrofonu jako přijímače i jako vysílače). Metoda jde realizovat pomocí tří mikrofonů (dva reciproké), nebo pomocí pomocného zdroje a dvou mikrofonů, z nichž je alespoň jeden reciproký.[2]

#### 5.1.1 Tlaková kalibrace

Ke spojení vysílače a přijímače slouží vazební člen ve tvaru válcové komůrky. Při kalibraci využívající tři mikrofony se postupně propojují jednotlivé mikrofony vazební komůrkou a měří se poměr výstupního napětí přijímače naprázdno a vstupního proudu vysílače. Jestliže známe akustickou přenosovou impedanci systému, lze stanovit součin citlivostí. Tímto měřením získáme tři různé součiny citlivosti, z kterých lze odvodit jednotlivé tlakové citlivosti všech tří mikrofonů.

Při kalibraci s pomocným zdrojem nejprve provedeme měření součinu citlivostí příslušných dvou mikrofonů, poté je zvlášť budíme pomocným zdrojem a měříme jejich výstupní napětí. Poměr těchto naměřených napětí je roven poměru citlivostí. Z naměřeného součinu a poměru tlakových citlivostí pak určíme jednotlivé citlivosti.

Měření se provádí ve vzduchu za normálního atmosférického tlaku a teplotě 20°C. Je vhodné měřit v plynech, ve kterých je větší rychlost šíření zvuku (vodík, helium).

#### 5.1.2 Kalibrace v poli postupné vlny

Tlaková citlivost změřená v tlakové komůrce nám neurčuje chování mikrofonu ve volném akustickém poli, jelikož předpokládáme rovnoměrné rozložení akustického tlaku na membráně. Je tedy nutné rozlišovat tlakovou citlivost a citlivost změřenou ve volném poli.

Postup kalibrace ve volném poli je obdobný jako u tlakové kalibrace. Do výpočtů se musí zahrnovat vzdálenost mezi měniči a i to, že je třeba tuto vzdálenost měřit u přijímače nebo vysílače od jeho akustického středu, který se posunuje podél osy

systému při zvyšující se frekvenci. Počítat se také musí s útlumem na dráze mezi měniči, kdy se při vyšších kmitočtech velmi projevuje.

### 5.1.3 Kalibrace v difuzním poli

Difuzní pole vytvoříme zdrojem zvuku umístěným v uzavřeném prostoru s odrazivými a nepravidelně situovanými rovinnými stěnami. V takovém prostoru působí na měnič energie zvuku ze všech směrů se stejnou pravděpodobností a ve všech bodech je stejná hustota energie. Měření se provádí v dozvukové komoře charakterizované geometrickými rozměry a dobou dozvuku.

## 5.2 Metoda pistonfonu a membranofonu

Metody pistonfonu a membranofonu[2] jsou založeny na vztahu mezi výchylkou pístu, membrány a akustickým tlakem v uzavřené komůrce. Metoda membranofonu se používá především pro druhotné kalibrace.

U pistonfonu je výhodou jednoduché a přesné měření výchylky pístu, nevýhodou je hmotnost pístu, která omezuje použití pouze pro nízké kmitočty. Jedná se o metodu absolutní, jelikož se akustický tlak se odvozuje ze základních fyzikálních veličin. Pro kontrolní cejchování se používají jednoduché vačkové bateriově poháněné pistonfony. Základní kalibrační kmitočet je 250 Hz, hladina akustického tlaku v dutině je  $124 \pm 0,2$  dB. Písty jsou uváděny do pohybu vačkou, která je poháněná elektromotorkem.

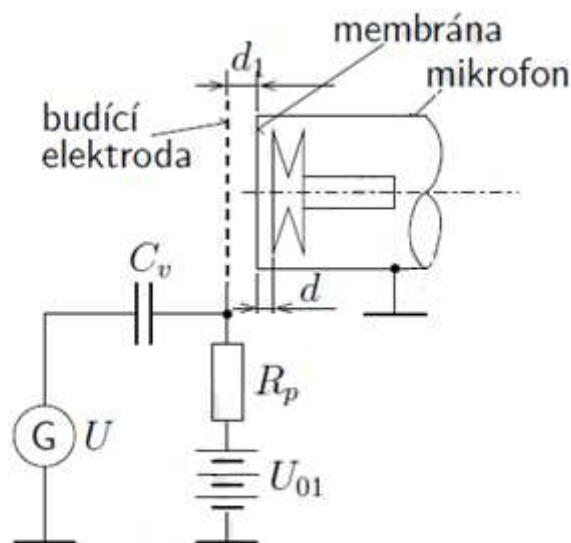


**Obr.10:** Příčný řez pistonfonem Brüel & Kjær Type 4228, palcový mikrofon s předzesilovačem vložený do pistonfonu[4]

## 5.3 Elektrostatická kalibrační metoda

Elektrostatická kalibrační metoda umožňuje ověřovat tlakovou citlivost kondenzátorových mikrofonů v širokém rozsahu frekvence. Metoda je založena na vybuzení membrány elektrostatickou silou vyvolanou mezi elektricky vodivou membránou a pomocnou vnější děrovanou elektrodou, která je až desetkrát dál než

membrána od pevné elektrody mikrofonu. Používá se jako druhotná tlaková kalibrace spolu s metodou pistonfonu.



**Obr.11:** Princip elektrostatische kalibrační metody

## 5.4 Kompenzační metody

Vychází se z rovnosti sil působících na membránu, která odděluje cejchovní a budící komůrku. Síla vyvolaná akustickým tlakem je na membráně kompenzována většinou elektrostaticky vybuzenou silou.

## 5.5 Substituční metoda

Mikrofon, u kterého byla citlivost stanovena metodou reciprocity, může být použitý jako zdroj zvuku ke kalibraci mikrofonu s neznámou citlivostí ve volném poli. Nicméně, hladina akustického tlaku od standardního mikrofonu jako zdroje zvuku je neprakticky nízká pro měření na vzdálenost ve volném poli (zejména při nízkých frekvencích). V důsledku těchto problémů se využívá elektrodynamických zdrojů zvuku pro vytváření dobré postupné vlny na pozici referenčního mikrofonu, který byl kalibrován primární metodou. Po změření výstupního napětí mikrofonu se na jeho místo vloží mikrofon s neznámou citlivostí (akustické středy těchto mikrofonů na stejný bod). Se stejným signálem ze zdroje zvuku se měří výstupní napětí mikrofonu s neznámou citlivostí.

Možné signály jako zdroj zvuku mohou být sinusové signály, náhodný šum, pravidelný šum i přechodné signály. Napětí mikrofonů může být měřeno analogovými



filtry a rms voltmetry, real-time digitálními filtry, dynamickými analyzátory signálů obsahující rychlou Fourierovu transformaci, nebo jiným zpracováním signálu.

Platnost substituční metody ve volném poli může být vyhodnocena porovnáním těchto kalibrací s výsledky z primární metody reciprocity. Takové vyhodnocení je nejpraktičtější způsob, jak ověřit takové měření.

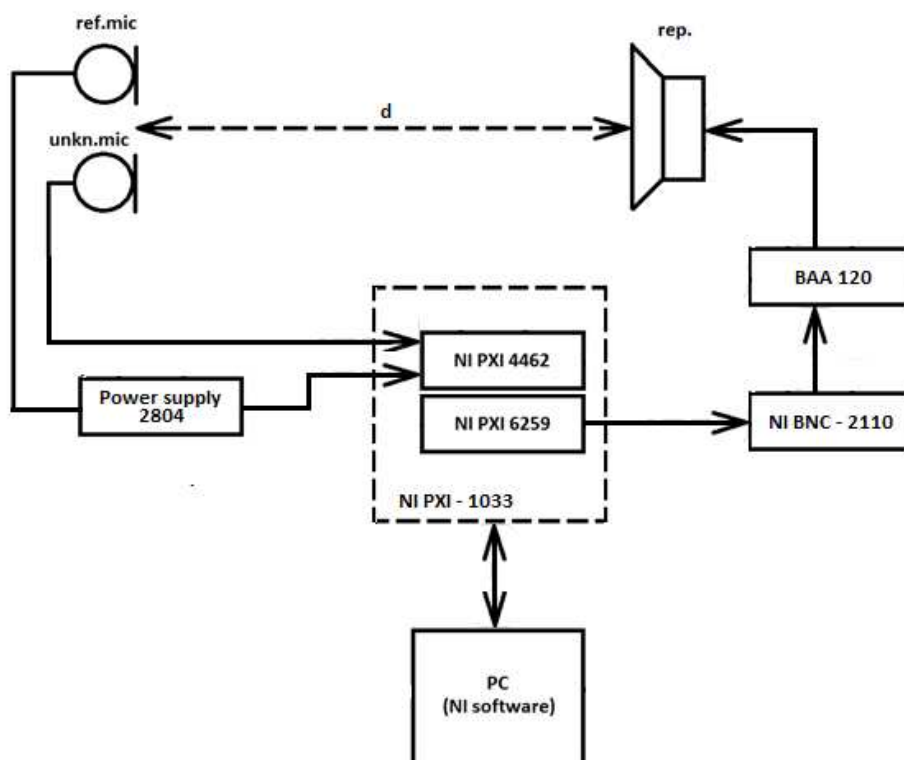
### **5.5.1 Srovnávací metoda**

Vychází ze substituční metody, nedochází k výměně mezi referenčním a měřeným mikrofonem, ale měření probíhá s oběma zároveň. Tímto způsobem se výrazně omezí zdroje chyb vyplývající z okolního hluku a snižuje požadavky na stabilitu použitého externího zdroje. Principiálně jde v metodě o srovnání známého s něčím neznámým.

Velký požadavek je kladený na kvalitu referenčního mikrofonu, který musí být velice stabilní a musí se znát co nejpřesněji jeho průběhy frekvenční charakteristiky. To nám zajistí správný přepočet měřeného mikrofonu.

## 6 MĚŘÍCÍ PRACOVISTĚ

Měřicí pracoviště bylo navrženo dle kritérií, které vyplývali z možností měření v laboratoři. Jelikož nebyla možnost použít bezodrazovou komoru a měření bylo vystaveno okolnímu hluku, byla zvolena srovnávací metoda, která tyto nežádoucí jevy minimalizuje. Jako referenční byl zvolen mikrofón Brüel & Kjær Type 4189, u kterého byl znám průběh frekvenční charakteristiky.



Obr.12: Blokové schéma měřicího pracoviště

### Power supply 2804

Dvoukanálový přenosný bateriově poháněný napájecí zdroj pro mikrofonní předzesilovač.

### Power amplifier TIRA BAA 120

Výkonový zesilovač určený pro napájení budícího reproduktoru.

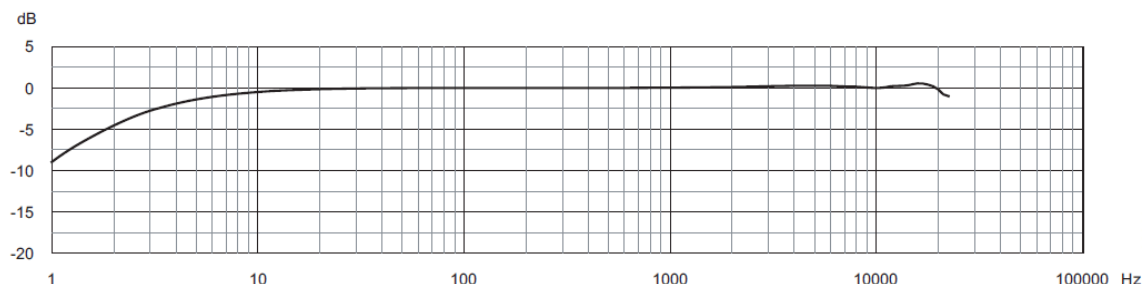
### NI BNC – 2110

Blok s konektory BNC pro snadné připojení analogových, digitálních vstupů a výstupů.

Mikrofony, reproduktor a stanice NI PXI – 1033 jsou dále popsány podrobněji.

## 6.1 Referenční mikrofon Brüel & Kjær Type 4189

Tento 1/2" předpolarizovaný mikrofon byl použitý jako referenční. Požadavek na referenční mikrofon je co nejlepší stabilita a stálá hodnota citlivosti v širokém rozsahu frekvence.



**Obr.13:** Frekvenční charakteristika mikrofonu Brüel & Kjær 4189

**Tab.3:** Vlastnosti mikrofonu Brüel & Kjær 4189:

|                                      |                |
|--------------------------------------|----------------|
| Citlivost (250 Hz)                   | 50 mV/Pa       |
| Citlivost ( $\pm 1,5$ dB při 250 Hz) | -26 dB         |
| Frekvenční rozsah                    | 6.3Hz – 20 kHz |
| Dynamický rozsah                     | 14.6 – 146 dB  |
| Polarizační napětí                   | 0 V            |



**Obr.14:** Kondenzátorový mikrofon Brüel & Kjær Type 4189

### Předzesilovač Brüel & Kjær Type 2661

Jedná se o předzesilovač pro 1/2" předpolarizované kondenzátorové mikrofony s výstupním konektorem LEMO. Předzesilovač obsahuje paměť pro čtení a zápis pro uložení dat o senzoru i jeho použití (TEDS).



**Obr.15:** Předzesilovač Brüel & Kjær Type 2661 s kabelem LEMO 1B

## 6.2 Mikrofon PCB model 378B02

Jedná se o sestavení kondenzátorového mikrofonu PCB Model 377B02 a předzesilovače PCB Model 426E01. Sestavení bylo použito jako neznámý měřený mikrofon.

### Kondenzátorový mikrofon PCB Model 377B02

Tento 1/2" předpolarizovaný mikrofon nabízí vysoce přesné a spolehlivé měření akustických signálů. Jde použít pro laboratorní účely i pro měření ve volném poli díky jeho dostatečné velikosti.

**Tab.4:** Vlastnosti mikrofону PCB 377B02:

|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| Citlivost (250 Hz)                   | 50 mV/Pa        |
| Citlivost ( $\pm 1,5$ dB při 250 Hz) | -26 dB          |
| Frekvenční rozsah ( $\pm 1$ dB)      | 5 – 10000 Hz    |
| Frekvenční rozsah ( $\pm 2$ dB)      | 3,15 – 20000 Hz |
| Dynamický rozsah                     | 146 dB          |
| Polarizační napětí                   | 0 V             |



**Obr.16:** Kondenzátorový mikrofon PCB Model 377B02

### **Předzesilovač PCB Model 426E01**

Jedná se o předzesilovač pro 1/2" předpolarizované kondenzátorové mikrofony s výstupním konektorem BNC. Předzesilovač obsahuje paměť pro čtení a zápis pro uložení dat o senzoru i jeho použití (TEDS).



**Obr.17:** Předzesilovač PCB Model 426E01

## **6.3 Reprodaktor**

Pro měření byly použity dva různé reproduktory. Jeden širokopásmový přímo vyzařující elektrodynamický reproduktor s vysokotónovým kuželem Tesla ARZ 6608 (30 W, frekvenční rozsah 60 – 20000 Hz) a malý basový reproduktor Tesla ARZ 369 (10 W, frekvenční rozsah 45 – 5000 Hz).



**Obr.18:** Tesla ARZ 369 (vlevo), Tesla ARZ 6608 (vpravo)

## **6.4 NI PXI – 1033**

Je to stanice s pěti periferními sloty pro připojení I/O modulů konstruovaná s integrovanou řídicí jednotkou pro dálkové ovládání aplikacemi. Propojení s počítačem je možné PCI Express kartou pro stolní PC nebo ExpressCard pro notebooky. PXI – 1033 zajišťuje transparentní, dálkové spojení s rychlostí a trvalou propustností až 110MB.



**Obr.19:** Stanice NI PXI – 1033

### 6.4.1 Karta NI PXI – 6259

Vysokorychlostní multifunkční karta pro sběr dat optimalizovaná pro vyšší přesnost při rychlé vzorkovací frekvenci. Kromě vstupů obsahuje 4 výstupy, z nichž byl jeden použitý pro buzení reproduktoru potřebným signálem.

**Tab.5:** Vlastnosti analogových výstupů karty NI PXI – 6259

|                  |               |
|------------------|---------------|
| Kanály           | 4             |
| Rozlišení        | 16 bitů       |
| Maximální napětí | 10 V          |
| Napěťový rozsah  | -10 V až 10 V |

### 6.4.2 Karta NI PXI – 4462

Tento modul je speciálně navržen pro záznam zvuku a vibrací. Zahrnutý hardware a software zaručuje vysokou přesnost při měření s mikrofony, akcelerometry a snímači, které mají veliký dynamický rozsah. Modul má čtyři analogové vstupy, z nichž byly při měření využívány dva (pro každý mikrofon jeden vstup).

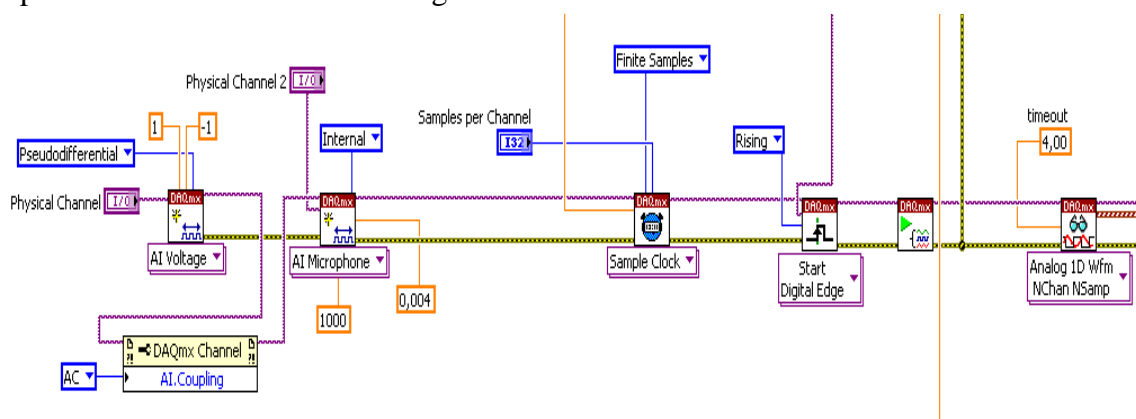
**Tab.6:** Vlastnosti analogových vstupů karty NI PXI – 4462

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| Kanály           | 4                 |
| Rozlišení        | 24 bitů           |
| Maximální napětí | 42,4 V            |
| Napěťový rozsah  | -42,4 V až 42,4 V |



### 7.1.2 Vstupní kanály pro sběr dat (slave)

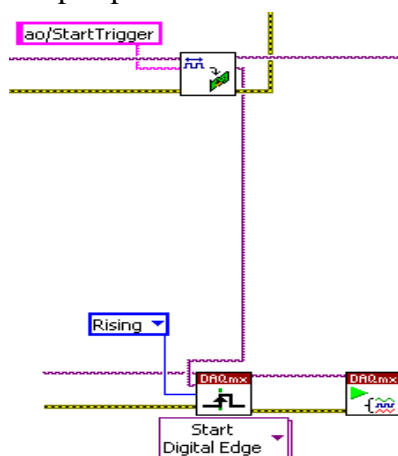
Tato část blokového diagramu je řešena obdobným způsobem jako úloha výstupního kanálu. Místo vytvořeného výstupního kanálu jsou vytvořeny dva vstupní kanály (pro každý mikrofon jeden), které fyzicky představují v našem případě analogové vstupy karty NI PXI – 4462. První vstup je napěťový vstup, který musel být použitý kvůli počátečním problémům se zesilovačem referenčního mikrofону. Druhý vstup je potom přímo tvořen blokem mikrofonního vstupu s citlivostí 1000mV/Pa, aby si oba signály odpovídaly. Získání dat z této úlohy zajišťuje blok, který čte data a posílá je do zpracovávací části blokového diagramu.



Obr.21: Blokový diagram vstupních kanálů

### 7.1.3 Synchronizace hodin

Je potřeba, aby výstupní a vstupní úloha pracovaly současně dle jednotného časování. Toho je docíleno dvěma propojenými bloky, kdy blok v řídicí úloze určí řízené úloze, které systémové hodiny má použít. Důležité je, aby se řízená úloha spustila dříve než řídicí, protože po spuštění čeká na časování řídicí úlohy.

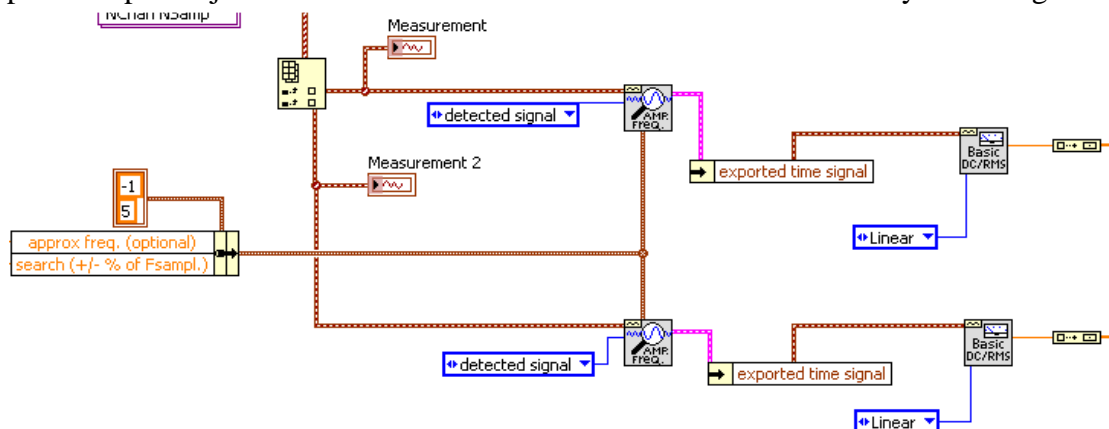


Obr.22: Blokový diagram synchronizace



### 7.1.4 Část zpracování získaných průběhů z mikrofónů

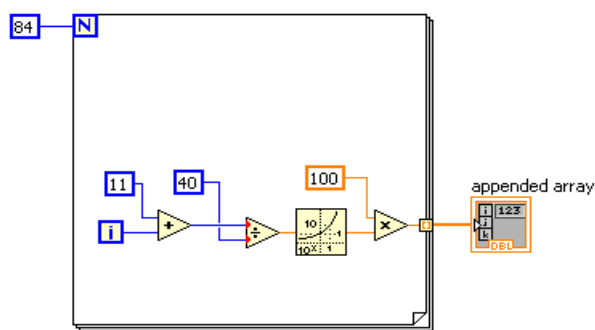
Po rozdělení dat na jednotlivé kanály se využívá blok (pro každý kanál), který detekuje signál o určité frekvenci a vytváří nový signál o amplitudě, která odpovídá amplitudě detekovaného signálu. Následujícím blokem se zjistí RMS hodnota signálu, která se přes známou citlivost referenčního mikrofónu a RMS hodnoty druhého kanálu přepočítá na potřebnou citlivost měřeného mikrofónu. Tyto hodnoty se uloží do matice spolu s odpovídajícími hodnotami frekvence a nakonec se zobrazí ve výsledném grafu.



Obr.23: Blokový diagram zpracování signálů

### 7.1.5 Posloupnost měřených frekvencí

Je převzata z měření firmy Brüel & Kjær, která ji používá u proměřování vlastních mikrofónů. Další možností, která je implementována je vlastní nastavení rozsahu a kroku změny.



Obr.24: Blokový diagram nastavování frekvence

## 7.2 Front panel hlavního programu

Obsahuje okno pro vykreslení výsledné charakteristiky, okna pro sledování generovaného signálu a signálů detekovaných mikrofony. Parametry, které lze nastavit:

- Tvar generovaného signálu
- Frekvence signálu
- Amplituda signálu
- Kanály vstupů a výstupu
- Typ generování měřených frekvencí
- Citlivost referenčního mikrofonu
- Sample rate a samples per chanel

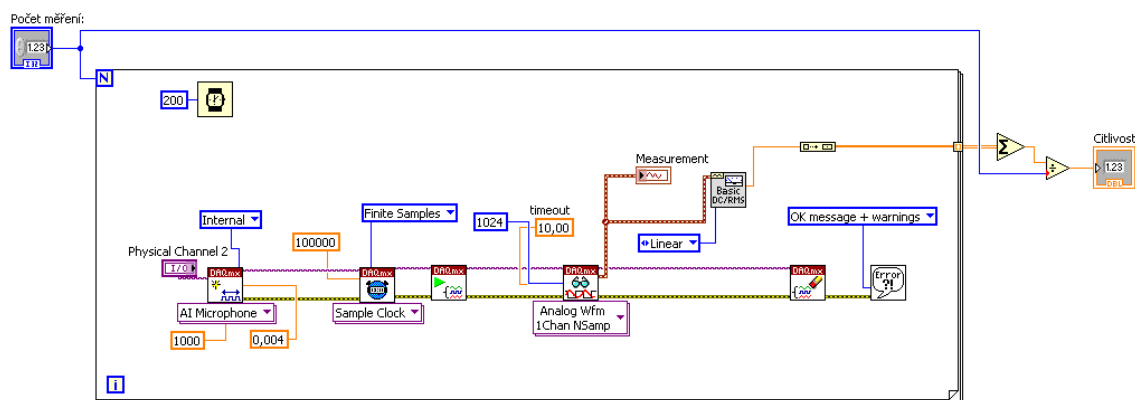
Sample rate určuje délku generovaného signálu, která by měla být kratší, než čas kdy dorazí první odražený signál. Určení je dle vzorce:

$$t = \frac{1500}{\text{sample rate}}$$

Samples per chanel určuje délku získaného signálu z mikrofonů, musí být větší než 1500. Velikost se mění v závislosti na vzdálenosti budícího reproduktoru a mikrofonů. Tato hodnota jde nastavovat pokusy, kdy si zobrazíme získaný signál mikrofonů.

## 7.3 Programy pro kalibraci mikrofonů pomocí kalibrátoru B&K type 4231

Jedná se o upravenou část úlohy se vstupními kanály, vždy pro jeden kanál. Kolik se nastaví na front panelu hodnot měření, tolik se jich provede. Nakonec se zobrazí výsledná průměrná hodnota citlivosti.



Obr.25: Blokový diagram kalibrace mikrofonu

## 8 MĚŘENÍ

Při měřeních byly použity dva typy reproduktorů. Typ ARZ 369 je basový reproduktor s malým rozsahem, takže frekvenční charakteristiky bylo možné měřit pouze do 15kHz. S reproduktorem ARZ 6608 bylo možné měřit frekvenční charakteristiku až do 20kHz.

### 8.1 Kalibrace kalibrátorem B&K type 4231

Kalibrátor kalibruje na frekvenci 1000Hz, má dva stupně akustického tlaku (94dB a 114dB). Výsledná citlivost mikrofónů byla získána z 50 měření.

Citlivost referenčního mikrofónu (B&K 4189): **45,55mV/Pa**

Citlivost měřeného mikrofónu (PCB 378B02): **53,1mV/Pa**



**Obr.26:** Kalibrátor B&K type 4231

### 8.2 Měření č.1

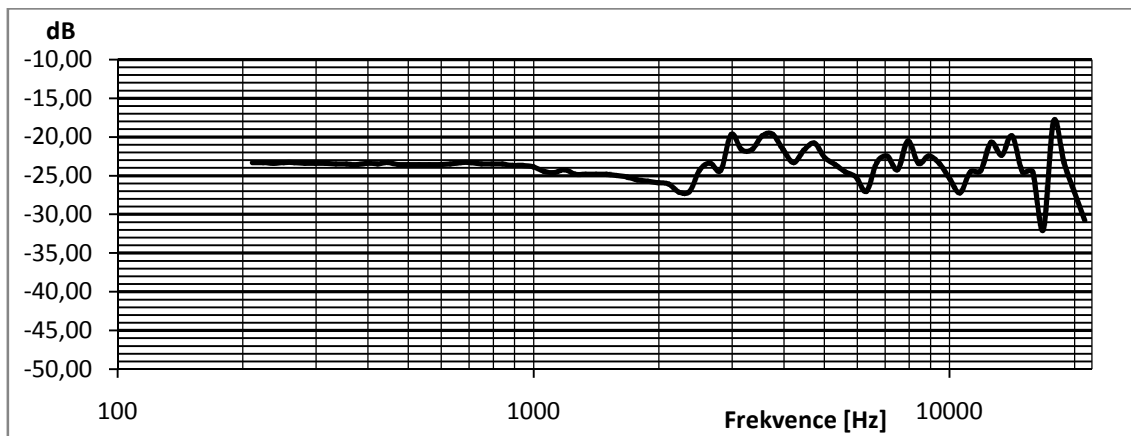
Toto měření demonstruje změnu tvaru frekvenční charakteristiky při měření v nevyhovujících prostorových podmínkách a v podmínkách, kdy se měřicí aparát nacházel ve volném prostoru.

**Tab.7:** Nastavení měření č.1 (ARZ 6608):

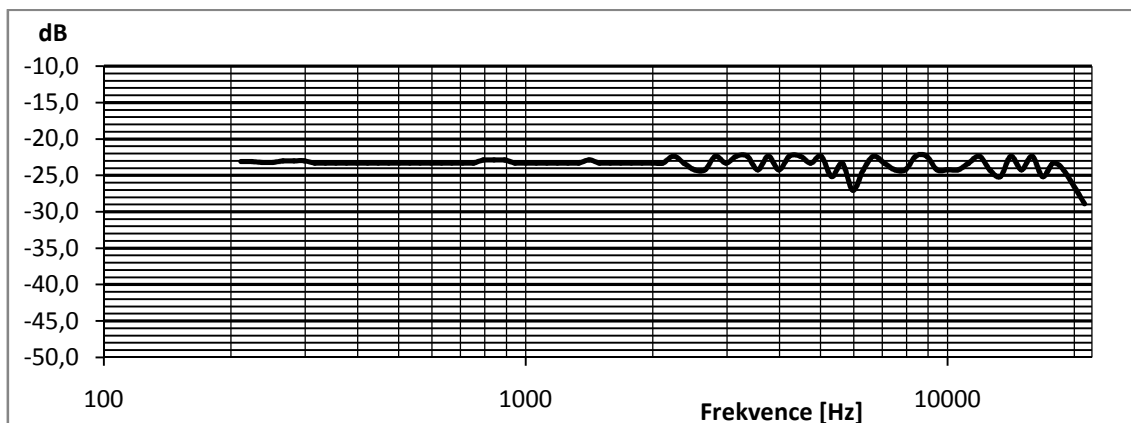
|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| Použitý reproduktor               | ARZ 6608 |
| Sample per chanel                 | 1650     |
| Sample rate                       | 110000   |
| Vzdálenost mezi mic. a rep.       | 0,5 m    |
| Tvar signálu                      | sinus    |
| Amplituda signálu                 | 2 V      |
| Počet měření pro jednotlivé frek. | 5        |

Citlivost měřeného mikrofonu PCB při 1000Hz:

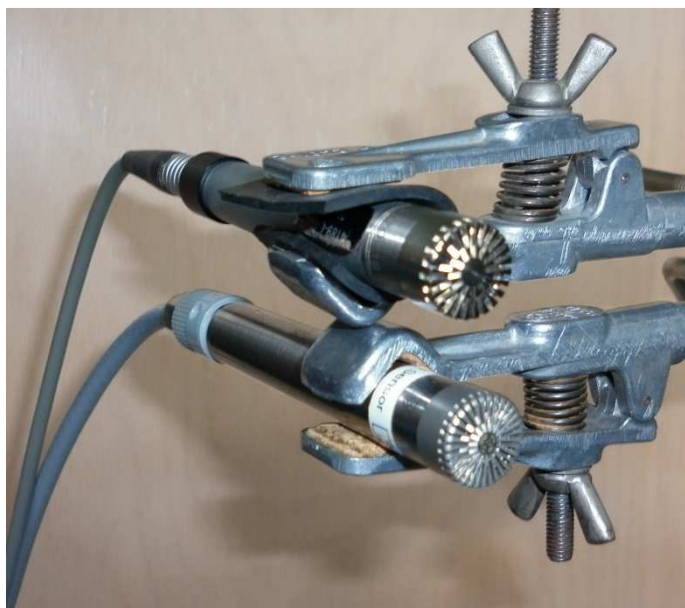
- Nevhodné podmínky:  $-23,87 \text{ dB} \rightarrow 64,05 \text{ mV/Pa}$
- Volný prostor:  $-23,3 \text{ dB} \rightarrow 68,39 \text{ mV/Pa}$



**Obr.27:** Frekvenční charakteristika při měření s nevyhovujícími podmínkami na stole



**Obr.28:** Frekvenční charakteristika při měření ve volném prostoru



**Obr.29:** Uchycení mikrofónů

## 8.3 Měření č.2

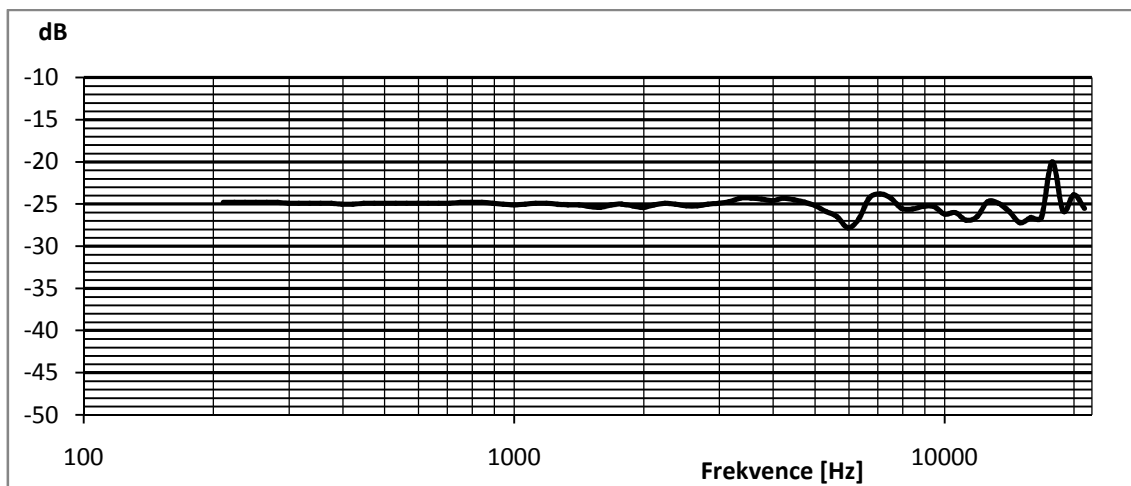
Měření, při kterém byly mikrofony uchyceny těsně vedle sebe. Měření proběhlo dvakrát pokaždé s jiným reproduktorem.

### 8.3.1 Reprodukter ARZ 6608

**Tab.8:** Nastavení měření č.2 (ARZ 6608):

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| Použitý reproduktor               | ARZ 6608 |
| Sample per chanel                 | 1650     |
| Sample rate                       | 110000   |
| Vzdálenost mezi mic. a rep.       | 0,5 m    |
| Tvar signálu                      | sinus    |
| Amplituda signálu                 | 4 V      |
| Počet měření pro jednotlivé frek. | 5        |

Citlivost měřeného mikrofónu PCB při 1000Hz:  $-25,1 \text{ dB} \rightarrow 55,6 \text{ mV/Pa}$



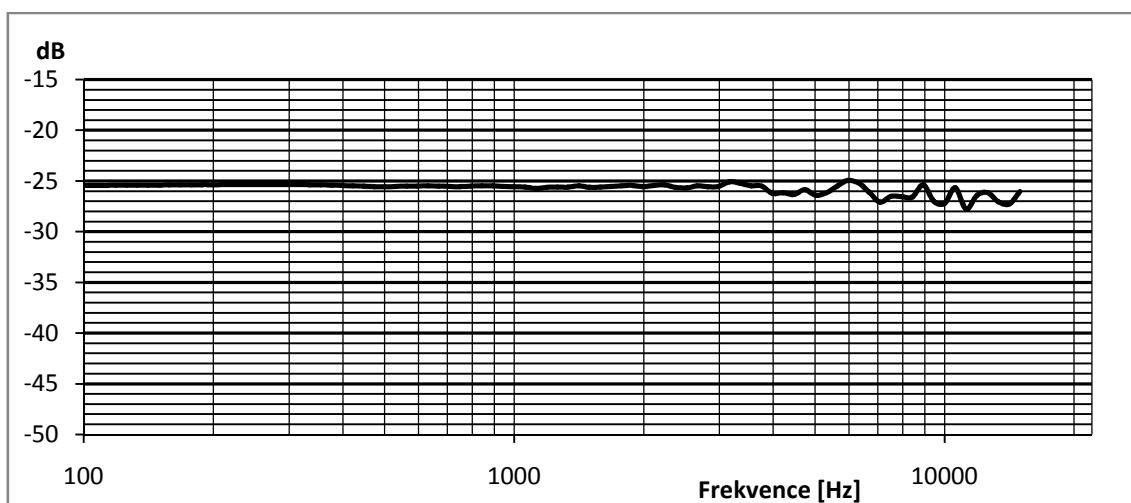
**Obr.30:** Frekvenční charakteristika (reproduktor ARZ 6608, mikrofony u sebe)

### 8.3.2 Reproduktor ARZ 369

**Tab.9:** Nastavení měření č.2 (ARZ 369):

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| Použitý reproduktor               | ARZ 369 |
| Sample per chanel                 | 1650    |
| Sample rate                       | 110000  |
| Vzdálenost mezi mic. a rep.       | 0,5 m   |
| Tvar signálu                      | sinus   |
| Amplituda signálu                 | 4 V     |
| Počet měření pro jednotlivé frek. | 5       |

Citlivost měřeného mikrofonu PCB při 1000Hz:  $-25,57 \text{ dB} \rightarrow 52,6 \text{ mV/Pa}$



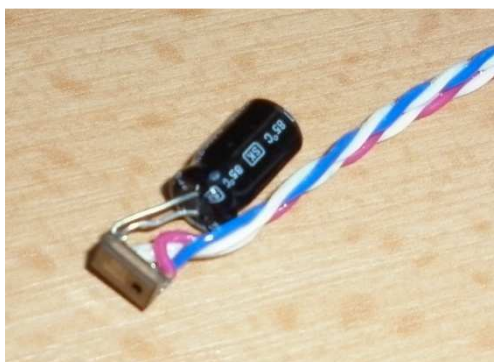
**Obr.31:** Frekvenční charakteristika (reproduktor ARZ 369, mikrofony u sebe)



**Obr.32:** Uchycení mikrofonů vedle sebe

## 8.4 Měření č.3

Měřený mikrofon byl typu MEMS, úkolem bylo zjistit jeho citlivost a frekvenční charakteristiku.



**Obr.33:** Měřený mems mikrofon



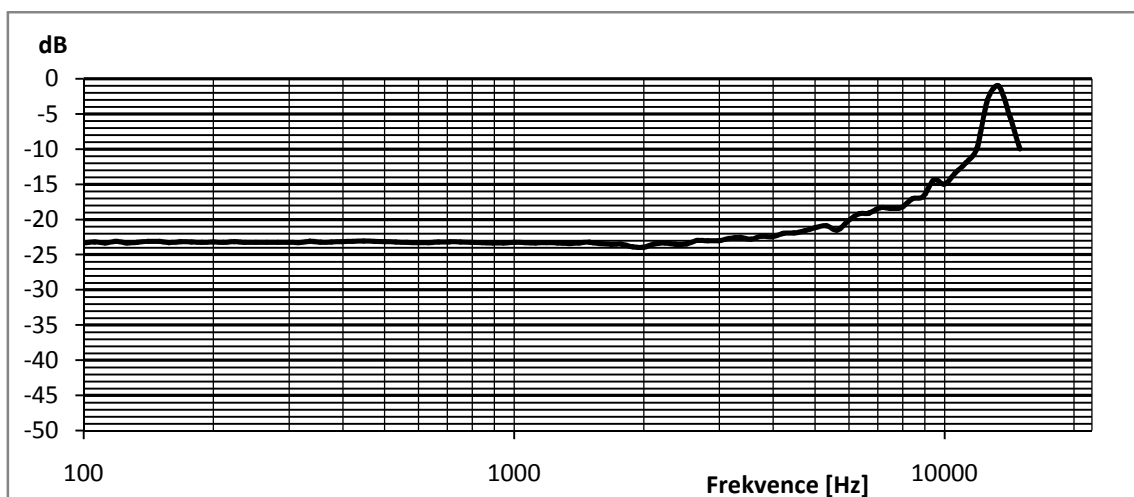
**Obr.34:** Uchycení MEMS mikrofonu a referenčního mikrofonu

**Tab.10:** Nastavení měření č.3:

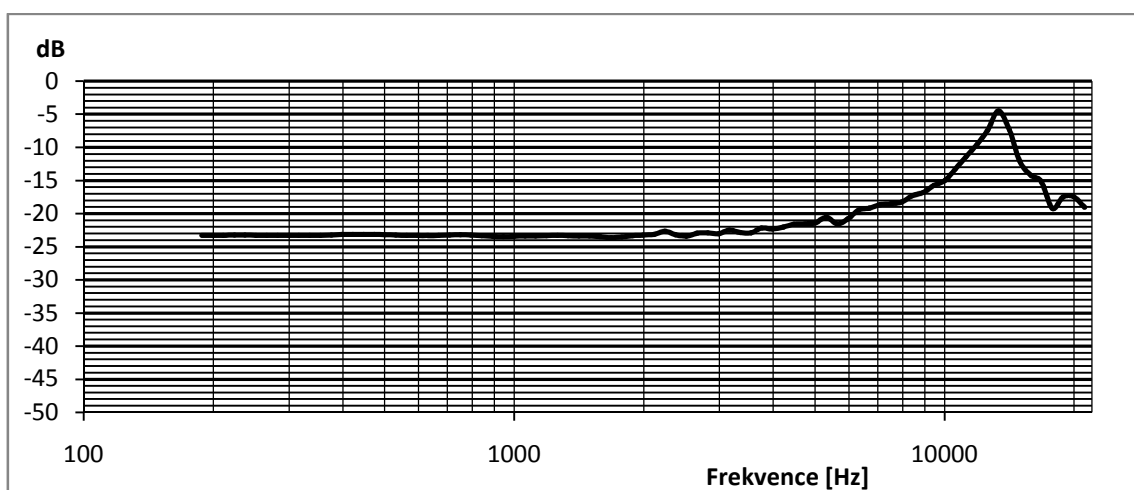
|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Sample per chanel                 | 1650   |
| Sample rate                       | 110000 |
| Vzdálenost mezi mic. a rep.       | 0,5 m  |
| Tvar signálu                      | sinus  |
| Amplituda signálu                 | 4 V    |
| Počet měření pro jednotlivé frek. | 5      |

Citlivost měřeného mikrofonu MEMS při 1000Hz:

- Rep. ARZ 369: -23,24 dB → 68,9 mV/Pa
- Rep. ARZ 6608: -23,44 dB → 67,3 mV/Pa



**Obr.35:** Frekvenční charakteristika MEMS (reproduktor ARZ 369)



**Obr.36:** Frekvenční charakteristika MEMS (reproduktor ARZ 6608)



## 9 ZÁVĚR

Na základě teoretického rozboru vlastností snímačů akustického tlaku a metod kalibrace, bylo navrženo měřicí pracoviště se všemi potřebnými přístroji. Dále byl postupně navrhován vhodný zpracovávací software v grafickém programovacím jazyce programu Labview. Softwarel navržený tak, aby byl plně automatický a vyžadoval jen základní nastavení hodnot vyplývajících z podmínek měření.

S funkčním softwarem dále proběhly zkušební měření, na základě se upravovali podmínky měření pro dosažení nejvhodnějších průběhů a citlivosti při frekvenci 1000Hz. Hodnota citlivosti byla srovnávána s hodnotou citlivostí změřenou pomocí kalibrátoru B&K type 4231. Nejlepší výsledek, kterého bylo dosaženo je chyba od citlivosti měřené kalibrátorem 0,5mV/Pa (0,94%).

Na základě zkušebních měření vyplynuly základní podmínky pro minimalizování chyb. Měřený mikrofón musí být v těsné blízkosti s referenčním mikrofónem, měřicí aparát by měl mít první odrazovou plochu co nejdál, průběh výsledné charakteristiky značně závisí na použitém reproduktoru (směrnost, velikost). Důležitým parametrem je správné umístění mikrofónů co nejlépe k vůči akustické ose reproduktoru.

## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| <b>Tab.1:</b> Rychlost šíření zvuku v některých prostředích.....       | 10 |
| <b>Tab.2:</b> Hladiny intenzit různých zdrojů zvuku .....              | 11 |
| <b>Tab.3:</b> Vlastnosti mikrofonu Brüel & Kjær 4189 .....             | 27 |
| <b>Tab.4:</b> Vlastnosti mikrofonu PCB 377B02 .....                    | 28 |
| <b>Tab.5:</b> Vlastnosti analogových výstupů karty NI PXI – 6259 ..... | 30 |
| <b>Tab.6:</b> Vlastnosti analogových vstupů karty NI PXI – 4462 .....  | 30 |
| <b>Tab.7:</b> Nastavení měření č.1 (ARZ 6608) .....                    | 34 |
| <b>Tab.8:</b> Nastavení měření č.2 (ARZ 6608) .....                    | 36 |
| <b>Tab.9:</b> Nastavení měření č.2 (ARZ 369).....                      | 37 |
| <b>Tab.10:</b> Nastavení měření č.3 .....                              | 39 |

## SEZNAM ZKRATEK

|             |  |
|-------------|--|
| <b>MEMS</b> | (Micro-Electro-Mechanical Systems) miniaturní elektromechanický systém |
| <b>CMOS</b> | (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) technologie<br>Výroby čipů   |
| <b>FET</b>  | (Field Effect Transistor) unipolární tranzistor                        |
| <b>TEDS</b> | (Transducer Electronic Data Sheet) elektronický katalogový list        |
| <b>VI</b>   | (Virtual Instruments) virtuální přístroj                               |
| <b>RMS</b>  | (Root Mean Square) efektivní hodnota                                   |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| <b>Obr.1:</b> Elektroakustický řetězec se snímačem zvuku a záznamem na CD .....  | 12 |
| <b>Obr.2:</b> Typické blokové schéma MEMS mikrofonu složené ze snímací části a převodníku .....                              | 14 |
| <b>Obr.3:</b> Princip elektretového mikrofonu s pevnou elektretovou elektrodou .....   | 16 |
| <b>Obr.4:</b> Princip dynamického mikrofonu .....  | 17 |
| <b>Obr.5:</b> Princip uhlíkového mikrofonu.....  | 17 |
| <b>Obr.6:</b> Princip piezoelektrického mikrofonu v membránovém provedení .....  | 18 |
| <b>Obr.7:</b> Frekvenční charakteristika mikrofonu Brüel & Kjær (½-inch Prepolarized Free-field Microphone – type 4950)..... | 20 |
| <b>Obr.8:</b> Tvary směrových charakteristik mikrofونů .....   | 21 |
| <b>Obr.9:</b> Směrová charakteristika mikrofonu Brüel & Kjær (Outdoor Microphone Unit – Type 4198) .....                     | 21 |
| <b>Obr.10:</b> Příčný řez pistonfonem Brüel & Kjær Type 4228, palcový mikrofون s předzesilovačem vložený do pistonfon .....  | 23 |
| <b>Obr.11:</b> Princip elektrostatické kalibrační metody .....   | 24 |
| <b>Obr.12:</b> Blokové schéma měřicího pracoviště.....   | 26 |
| <b>Obr.13:</b> Frekvenční charakteristika mikrofonu Brüel & Kjær 4189.....   | 27 |
| <b>Obr.14:</b> Kondenzátorový mikrofون Brüel & Kjær Type 4189 .....  | 27 |
| <b>Obr.15:</b> Předzesilovač Brüel & Kjær Type 2661 s kabelem LEMO 1B .....  | 28 |
| <b>Obr.16:</b> Kondenzátorový mikrofون PCB Model 377B02.....   | 28 |
| <b>Obr.17:</b> Předzesilovač PCB Model 426E01 .....  | 29 |
| <b>Obr.18:</b> Tesla ARZ 369 (vlevo), Tesla ARZ 6608 (vpravo) .....  | 29 |
| <b>Obr.19:</b> Stanice NI PXI – 1033.....  | 30 |
| <b>Obr.20:</b> Blokový diagram výstupního kanálu.....  | 31 |
| <b>Obr.21:</b> Blokový diagram vstupních kanálů .....  | 32 |
| <b>Obr.22:</b> Blokový diagram synchronizace .....   | 32 |
| <b>Obr.23:</b> Blokový diagram zpracování signálů .....  | 33 |
| <b>Obr.24:</b> Blokový diagram nastavování frekvence .....   | 33 |
| <b>Obr.25:</b> Blokový diagram kalibrace mikrofonu.....  | 34 |
| <b>Obr.26:</b> Kalibrátor B&K type 4231 .....  | 35 |
| <b>Obr.27:</b> Frekvenční charakteristika při měření s nevyhovujícími podmínkami na stole.....                               | 36 |
| <b>Obr.28:</b> Frekvenční charakteristika při měření ve volném prostoru.....   | 36 |
| <b>Obr.29:</b> Uchycení mikrofونů.....   | 37 |
| <b>Obr.30:</b> Frekvenční charakteristika (reproduktor ARZ 6608, mikrofony u sebe).....                                      | 38 |
| <b>Obr.31:</b> Frekvenční charakteristika (reproduktor ARZ 369, mikrofony u sebe).....                                       | 38 |
| <b>Obr.32:</b> Uchycení mikrofونů vedle sebe .....   | 39 |
| <b>Obr.33:</b> Měření mems mikrofون .....  | 39 |
| <b>Obr.34:</b> Uchycení MEMS mikrofonu a referenčního mikrofonu .....  | 39 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Obr.35:</b> Frekvenční charakteristika MEMS (reproduktor ARZ 369) .....  | 40 |
| <b>Obr.36:</b> Frekvenční charakteristika MEMS (reproduktor ARZ 6608) ..... | 40 |

# LITERATURA

- [1] Škvor, Z. *Elektroakustika a aplikovaná akustika*. 2. vyd. ČVUT, 1999. 130 s. ISBN 80-01-01908-X
- [2] Škvor, Z. *Elektroakustika - měření*. 3. vyd. ČVUT, 1995. 214 s. ISBN 80-01-01258-1
- [3] Wirsum, S. *Abeceda nf techniky*. 1. vyd. BEN – technická literatura, 1998. 191 s. ISBN 80-86056-26-0
- [4] Brüel & Kjær. *Microphone Handbook vol.1*. [online]. 1996, [cit. 2011-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/be1447.pdf>>
- [5] Brüel & Kjær. *Measuring sound*. [online]. 1984, [cit. 2011-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.bksv.com/doc/br0047.pdf>>
- [6] ITWissen. *Mems-microphone*. [online]. 1984, [cit. 2011-04-11]. Dostupný z WWW: <cid:op.mhtml.1294943406279.20e35f0e0b2a9847@192.168.1.101>
- [7] *Akustika, vznik a šíření zvuku*. [online]. [cit. 2011-02-18]. Dostupný z WWW: <[http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)>
- [8] Edutorium. *Akustika* [online]. [cit. 2011-02-18]. Dostupný z WWW: <[http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?mn1=100&mn2=431&xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?mn1=100&mn2=431&xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h)>

# SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha 1.** DVD (elektronická verze práce, hlavní program pro měření frek. char., programy pro kalibraci mikrofونů, naměřená data)